

УДК 538.69:331.45

В. А. Глива, д-р техн. наук (НАУ)  
В. Г. Здановський, д-р техн. наук (ДУ «ННДІОПБОП»)  
Л. О. Левченко, канд. екон. наук (НТУУ «КПІ»)  
Т. М. Перельот (НАУ)

## ДЖЕРЕЛА ГАРМОНІК МАГНІТНОГО ПОЛЯ У БУДІВЛЯХ І СПОРУДАХ ТА МІНІМІЗАЦІЯ ЇХ РІВНІВ

*Розглянуто гармонічний склад магнітних полів у сучасних будівлях та спорудах, та виявлено джерела їх генерації. Наведено результати вимірювання рівнів спектрального складу магнітних полів у приміщеннях з різним внеском нелінійних електроспоживачів у загальне навантаження на силову мережу. Виявлено, що найбільш критичною гармонічною складовою є магнітні поля частотою 150 Гц, генеровані некомпенсованими електрострумами у нульових робочих провідниках трифазної силової електромережі. Запропоновано шляхи зниження рівнів магнітних полів у будівлях та спорудах.*

**Ключові слова:** магнітне поле, спектральний склад магнітних полів, гармоніки, інтергармоніки.

*Рассмотрен гармонический состав магнитных полей в современных зданиях и сооружениях, и выявлены источники их генерации. Приведены результаты измерения уровней спектрального состава магнитных полей в помещениях с различным вкладом нелинейных электропотребителей в общую нагрузку на силовую сеть. Выведено, что наиболее критической гармонической составляющей являются магнитные поля частотой 150 Гц, генерируемые некомпенсированными электротоками в нулевых рабочих проводниках трехфазной силовой электросети. Предложены пути снижения уровней магнитных полей в зданиях и сооружениях.*

**Ключевые слова:** магнитное поле, спектральный состав магнитных полей, гармоника, интергармоника.

*Harmonic composition of the magnetic fields is considered in modern buildings and buildings, and the sources of their generation are exposed. Level measurement results of spectral composition of magnetic fields in the rooms with different contribution nonlinear electrical loads into power line common load are mentioned. It is exposed, that the most critical harmonic constituent are the magnetic fields by frequency 150 Hz, generated the uncompensated electro-currents in zero workings explorers of the three-phase power electric system. The ways of reducing the levels of magnetic fields in buildings and structures are suggested.*

**Keywords:** magnetic field, spectral composition of magnetic fields, harmonic, interharmonics.

*Вступ.* Зміна характеру електронавантаження на силову електромережу промислових, адміністративних та інших будівель і споруд має наслідком небажані зміни електромагнітної обстановки у виробничих приміщеннях.

Це пояснюється появою значної кількості електричного та електронного обладнання з нелінійним електроспоживанням, результатом чого є зміна гармонічного складу напруги живлення, що може призводити до підвищення рівня електроспоживання, виходу з ладу технологічного обладнання, аварій у силовій мережі.

Ще одним небажаним явищем є дисбаланс електрострумів у фазних та нульових робочих провідниках, який є причиною генерації магнітних полів наднормативних рівнів.

*Стан проблеми.* Дослідженню спотворень синусоїдальності напруги (електроструму) у системах електроживлення, які є джерелами гармонік у цих системах, присвячено багато робіт. Вони стосуються, в основному, проблематики енергозбереження, захисту обладнання від надмірного зносу та уникнення аварій у силових мережах [1–3].

У ряді публікацій наголошується на загостренні цієї проблеми, що є предметом електромагнітної сумісності обладнання. Її складовою є несинусоїдні режими, що полягають у наявності у кривих струмів і напруг різних гармонічних складових – вищих гармонік, субгармонік та інтергармонік [4]. Зокрема виявлено, що традиційні методи зниження рівнів гармонік – використання резонансних фільтрокомпенсуючих пристроїв не забезпечують бажаного ефекту.

У роботі [5] розроблено комплексний підхід до компенсації реактивної потужності та зниження несинусоїдальності напруги у мережах з нелінійними навантаженнями, що генерують як вищі гармоніки, так й інтергармоніки. Втім ці дослідження стосуються потужного обладнання – дугових сталеплавильних печей, тобто джерело нелінійності єдине та локалізоване у просторі, що не є типовим для більшості виробничих умов.

Ще одним наслідком такого явища є поява у кабелях електроживлення некомпенсованих струмів вищих гармонік промислової частоти 50 Гц, які протікають по нульових робочих провідниках і генерують магнітні поля гігієнічно значущих рівнів. Більшість досліджень присвячено впливу таких полів на технічні засоби [6] або стосуються магнітних полів заздалегідь наднормативних рівнів, генерованих електрозварювальним обладнанням [7]. У роботі [8] досліджено появу некомпенсованих електрострумів у трифазній силовій мережі, але пропозиції щодо зниження генерованих ними магнітних полів стосуються виключно засобів обчислювальної техніки, обладнаних імпульсними джерелами живлення. Важливим уявляється дослідження загальних закономірностей появи гармонік електроструму промислової частоти з точки зору охорони праці, визначення рівнів генерованих ними магнітних полів і розроблення підходів до їх зниження.

*Мета статті* є експериментальні дослідження гармонічного складу магнітних полів у будівлях і спорудах, виявлення джерел їх генерації та умов мінімізації.

Дослідження виконувались у виробничих будівлях та їх окремих приміщеннях із різною часткою нелінійних споживачів у загальному електронавантаженні силової мережі. Як тестові обиралися ланки силової мережі, на яких нелінійні навантаження складали приблизно: до 15 %, до 20 % та більше 25 %. Натурні вимірювання здійснювались за допомогою електротехнічних кліщів марки DT-9809 (електроструми промислової частоти 50 Гц). Амплітуди гармонік та інтергармонік промислової частоти визначалися зі спектра магнітних полів, генерованих електрострумами фазних і нульових робочих провідників пристроєм контролю гармонійного складу електричного струму промислової частоти (заявка U201404648).

Частота та синусоїдальність електроструму без навантаження контролювалися за допомогою цифрового запам'ятовуючого осцилографа Tektronix TDS2022C. Останнє є обов'язковим для виключення зовнішнього впливу на формування гармонійного складу електроструму у силовій мережі будівлі.

Розглянемо механізм появи в електромережі гармонік та інтергармонік електроструму промислової частоти.

Характер електроструму нелінійного (імпульсного) споживача обумовлює спотворення синусоїдальної напруги на вході навантаження. Це так звана «пласка» синусоїда, що є наслідком падіння напруги на внутрішньому опорі електромережі. Спотворена напруга  $U_n$  на вході навантаження обчислюється за формулою:

$$U_n(f) = U_m(f) - I(f) \cdot Z_m, \quad (1)$$

де  $U_m(f)$  – синусоїдальна напруга силової мережі;

$I(f)$  – імпульсний електрострум навантаження;

$Z_m$  – повний опір мережі з боку навантаження.

Несинусоїдальні електроструми викликають падіння напруги на опорі  $Z_m$ , що є наслідком появи на вході нелінійного споживача «пласкої» синусоїди напруги. Це саме спостерігається на вході усіх електроспоживачів, увімкнутих паралельно цьому навантаженню.

Несинусоїдальність напруги у системах електроживлення непокоїть електротехніків та енергетиків через зниження коефіцієнтів корисної дії електротехнічного обладнання та його прискорене зношення: гальмування роторів електричних машин, перегрів трансформаторів та ізоляційних покриттів, нештатна робота та вихід з ладу батарей конденсаторів для компенсації реактивного навантаження тощо.

З огляду на охорону праці це явище є причиною підвищення рівнів магнітних полів як у окремих приміщеннях, так і в будівлях у цілому. Це

обумовлено розосередженням нелінійних споживачів у будівлі, їх змінною кількістю та різними режимами роботи.

Спотворення синусоїдальності напруги (електроструму) змінює їх гармонійний склад, що призводить до появи небажаних, з точки зору електромагнітної безпеки, некомпенсованих електрострумів у силовій електромережі.

За симетричного навантаження (навантаження кожної фази не перевищує нормативне відхилення у 10 %) фазні електроструми основної частоти створюють системи прямої та зворотної послідовності та дають у сумі нульове значення.

Гармоніки, кратні трьом, створюють системи нульової послідовності, тобто мають у будь-який момент однакові амплітуди і фази. Через це у нульовому робочому провіднику виникають електроструми, що дорівнюють потроєній сумі струмів вищих гармонік, кратних трьом. За несинусоїдального симетричного електронавантаження струм у нульовому робочому провіднику дорівнює

$$I_N = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_n^2}, \quad (2)$$

де  $I_3, I_9, \dots, I_n$  – діючі значення відповідних гармонік електроструму;  
 $n$  – непарне число, кратне трьом.

Таким чином, за нелінійних навантажень електрострум у нульових робочих провідниках може значно перевищувати електрострум у фазах і залежить від частки нелінійного навантаження у загальному навантаженні силової мережі. Розгляд амплітудних значень вищих гармонік показав, що з точки зору електромагнітної безпеки практичне значення має врахування тільки третьої гармоніки частотою 150 Гц.

Натурні вимірювання електрострумів у силовій мережі показали, що струми у фазах та нульовому провіднику мають великі розбіжності. Типові їх співвідношення наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

*Електроструми у силовій мережі будівлі\**

| Фаза А, А | Фаза В, А | Фаза С, А | Нейтраль N, А |
|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 58        | 66        | 69        | 106           |
| 56        | 57        | 72        | 108           |
| 61        | 56        | 69        | 104           |
| 2         | 31        | 28        | 42            |
| 28        | 31        | 26        | 38            |
| 34        | 26        | 32        | 41            |

\* Значення електрострумів округлене. Можливість наявності струмів витоку не враховувалася

Очевидно, що наявність некомпенсованих електрострумів є причиною появи відповідних магнітних полів. Їх рівні можуть бути визначені зі співвідношення Біо-Савара-Лапласа:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{r^3} (d\mathbf{l} \times \mathbf{r}),$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{r^2} \cdot dl \cdot \sin\varphi,$$
(3)

де  $\mu_0$  – магнітна стала;

$I$  – сила струму;

$dl$  – лінійний елемент струму;

$r$  – радіус-вектор від елемента струму до точки спостереження;

$\varphi$  – кут між векторами  $dl$  та  $r$ .

Розрахунки індукції магнітного поля для провідника фіксованої довжини (4) показали, що для приміщення розмірами 6 x 8 м для сегмента довжиною 8 м і електроструму 5 А індукція магнітного поля на відстані 1,0 ... 1,5 м від стіни складає до 0,2 мкТл, а за умови протікання такого струму мережею електроживлення за периметром приміщення (5) – 0,9 мкТл у його центрі. Такі значення більш ніж утричі перевищують гранично допустимий рівень для експлуатації комп'ютерної техніки.

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4\pi \cdot r} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)$$

та

(4)

$$B = \frac{2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot \sqrt{x^2 + y^2}}{\pi \cdot x \cdot y}$$
(5)

де  $\mu$  – магнітна проникність середовища;

$\mu_0$  – магнітна стала;

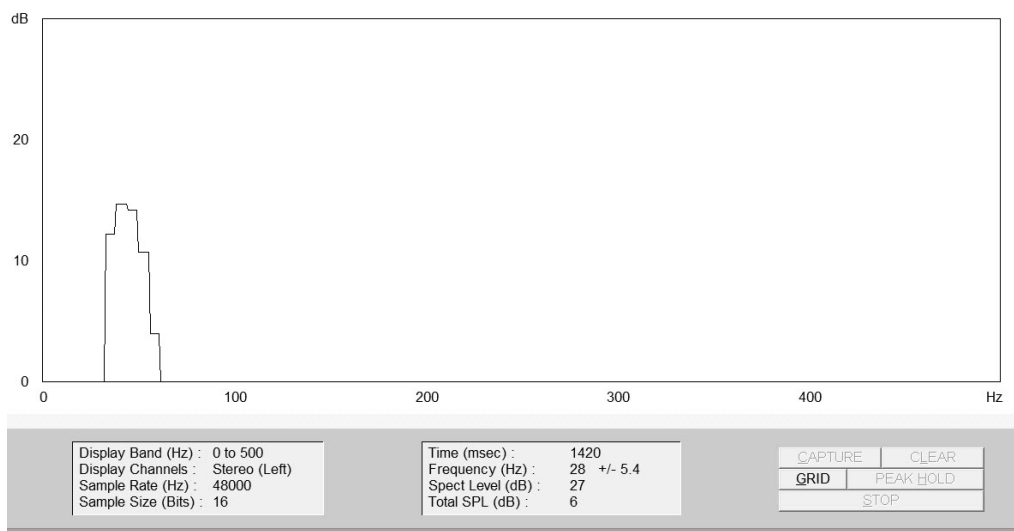
$I$  – ефективне значення електроструму;

$r$  – відстань від провідника до точки визначення поля,

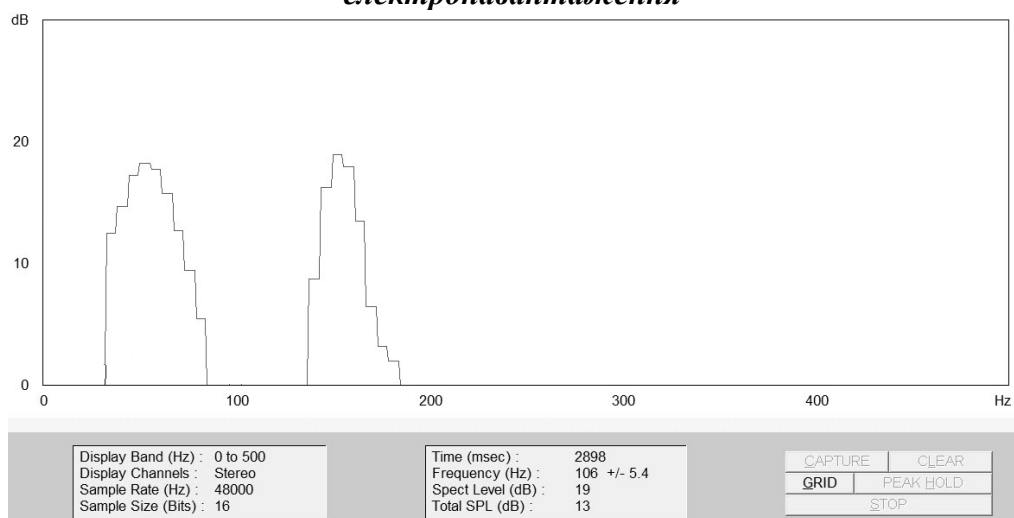
$\varphi_1, \varphi_2$  – кути між кінцями сегмента зі струмом і напрямками до точки спостереження (відраховуються в одну сторону);

$x, y$  – довжина та ширина приміщення.

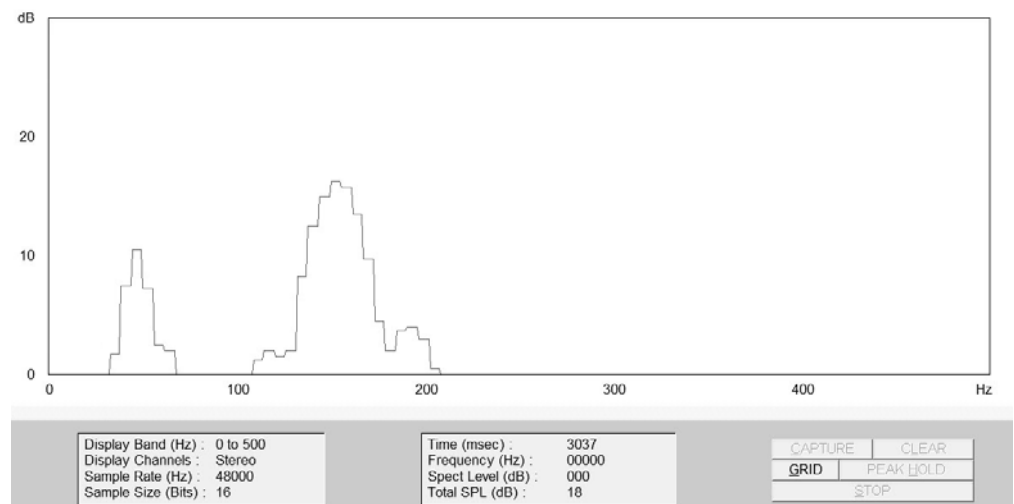
Вимірювання рівнів спектрального складу магнітних полів у приміщеннях із різним внеском нелінійних електроспоживачів у загальне навантаження на силову мережу свідчать про однозначний зв'язок цих полів із некомпенсованими струмами у мережі електроживлення (рис. 1).



**а) нелінійні навантаження складають менше ніж 10 % загального електронавантаження**



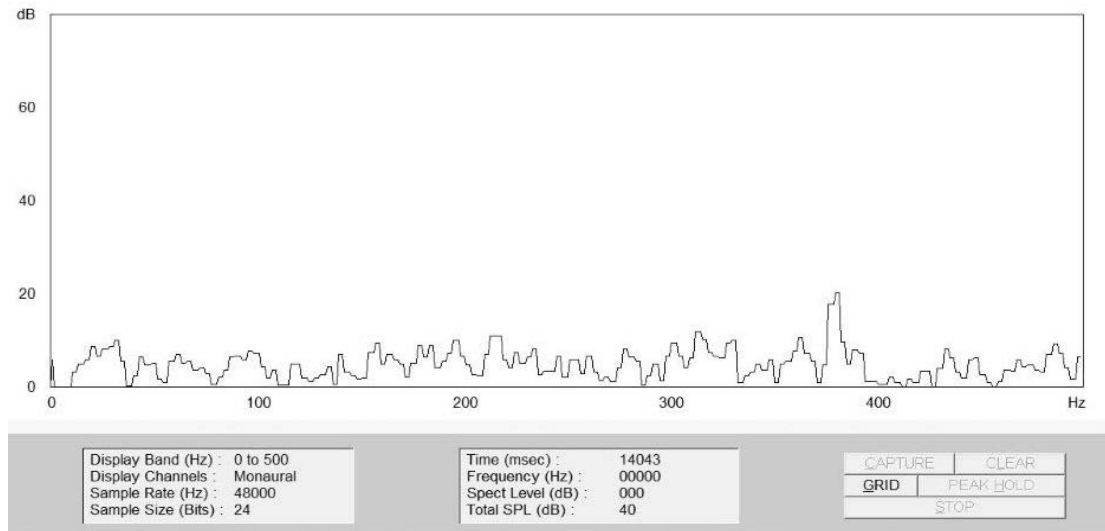
**б) нелінійні навантаження складають 15...20 % загального електронавантаження**



**в) нелінійні навантаження складають більше ніж 25 %**

**Рис. 1. Спектральний склад магнітних полів у виробничих приміщеннях з різним внеском нелінійного електроспоживання**

Деякі відмінності спектральних складів магнітних полів у приміщеннях та електрострумів у силових мережах пояснюються внеском у електромагнітну обстановку магнітних полів електронних технічних засобів, які можуть мати складний механізм генерації. Спектр магнітного поля джерела живлення портативного комп'ютера при його підключенні до електромережі наведено на рисунку (рис. 2).



**Рис. 2. Спектральний склад магнітного поля джерела електроживлення портативного комп'ютера потужністю 330 Вт**

Перерахунок рівнів магнітних полів з логарифмічних одиниць у фактичну напруженість магнітного поля здійснювався зі співвідношення (6):

$$U_{\text{BX}}(\text{дБ}) = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{BX}}(\text{В})}{U_{\text{K}}(\text{В})}, \quad (6)$$

де  $U_{\text{BX}}(\text{дБ})$  – рівень сигналу у дБ (з екранної форми рис. 6);

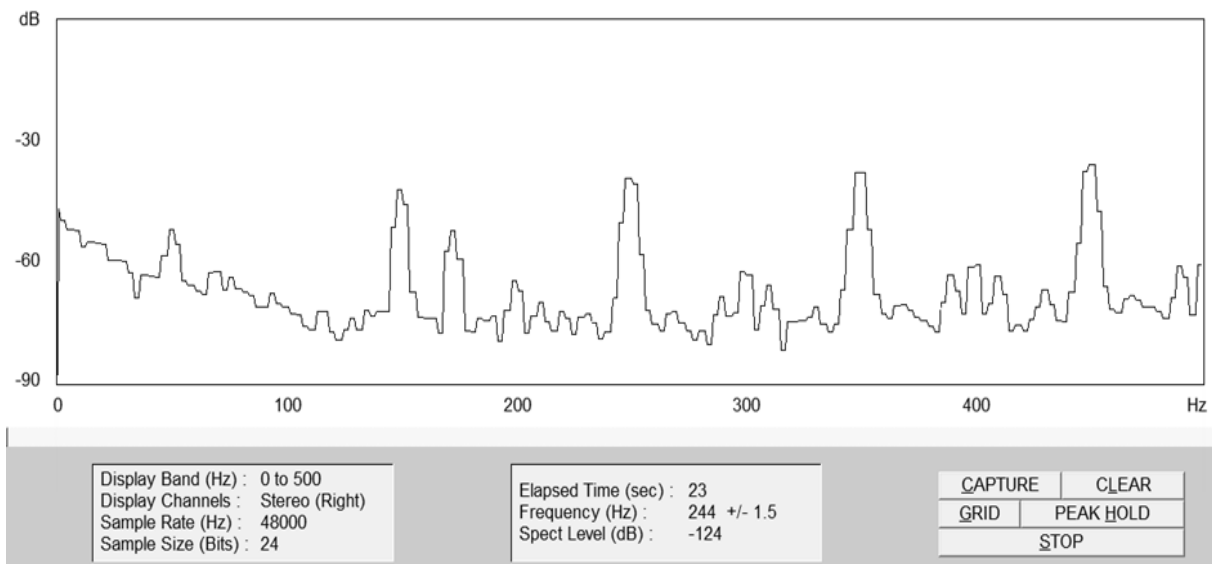
$U_{\text{BX}}(\text{В})$  – рівень електричного сигналу з датчика магнітного поля у вольтах;

$U_{\text{K}}(\text{В})$  – робоча напруга звукової карти персонального комп'ютера у вольтах.

Фактичні значення індукції магнітного поля отримують з калібрувальної таблиці датчика магнітного поля. Так, частоті 50 Гц відповідає чутливість 0,780 мВ/мкТл, частоті 100 Гц – 0,784 мВ/мкТл, 150 Гц – 0,788 мВ/мкТл, 200 Гц – 0,793 мВ/мкТл.

Магнітне поле, генероване єдиним джерелом живлення, не впливає на електромагнітну обстановку у приміщенні, але дає суттєвий внесок у сумарне магнітне поле на робочому місці користувача через наближеність до нього. Враховуючи різноманітність та кількість

електронних пристроїв у сучасних виробничих будівлях такий вплив необхідно оцінювати у кожному окремому випадку. До того ж, спектральний склад та амплітудні значення магнітних полів, навіть однотипних джерел, значно відрізняються. Результати вимірювання такого складу для приладу, повністю аналогічному на рис. 2, наведено на рис. 3.



**Рис. 3. Спектральний склад магнітного поля джерела електроживлення портативного комп'ютера**

Отримані результати обумовлюють необхідність визначення шляхів зниження впливу на працюючих магнітних полів некомпенсованих електрострумів у мережах електроживлення будівель і магнітних полів гармонік та інтергармонік магнітного поля промислової частоти. Особливо це стосується магнітного поля частотою 150 Гц.

Використання джерел безперебійного живлення подвійного перетворення дає позитивний ефект, але обмежене за потужностями. Їх застосування доцільне при експлуатації автоматизованих систем за наявності однорідних технічних засобів [8].

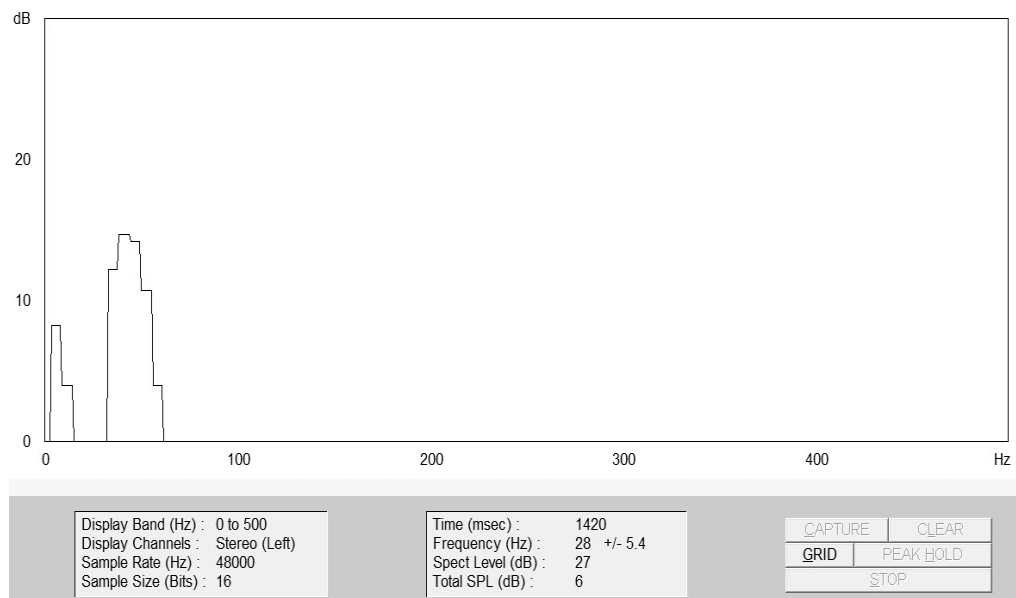
Упровадження заходів зі зниження електромагнітного навантаження на середовище будівель доцільне у такій послідовності:

- зниження частки нелінійних електроспоживачів у загальне навантаження на силову електромережу будівлі;
- дистанціювання людей від джерел електромагнітних полів зі складним частотним спектром;
- екранування, принаймні нульових робочих провідників, феромагнітними оболонками. Це ж стосується розподільчих щитів (зазвичай їх корпуси виготовлено із найдешевшого матеріалу без урахування специфіки умов експлуатації);
- неперервний контроль рівномірного навантаження фаз трифазної силової електромережі.

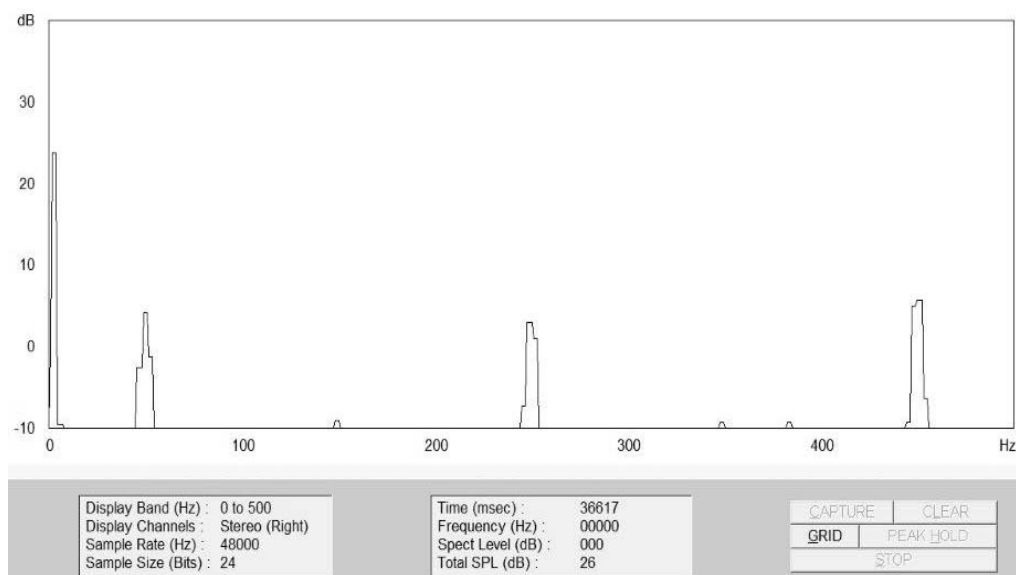


У кожному конкретному випадку розроблення та впровадження заходів із підвищення електромагнітної безпеки здійснюється після визначення електромагнітної обстановки як на окремих робочих місцях, так і в будівлі в цілому, з обов'язковим контролем гармонійного складу магнітних полів.

Проведене дослідження не можна вважати повністю завершеним. Не виявлено загальних закономірностей появи інтергармонік (як канонічних, так і неканонічних) у реальних виробничих умовах. Як показали дослідження, їх амплітудні значення можуть бути суттєвими (рис. 4).



**а) магнітне поле з інтергармонікою частотою 12,5 Гц**



**б) магнітне поле з неканонічною гармонікою та гармонікою, що не кратна трьом**

**Рис. 4. Гармонійний склад магнітного поля у виробничому приміщенні з наявністю нестандартних гармонік та інтегармонік**

Як видно зі спектрів, за наявності задовільного гармонійного складу з'являється інтергармоніка магнітного поля, за своєю амплітудою порівняна з рівнем магнітного поля основної частоти 50 Гц, що не може вважатися прийнятним (рис. 4,б). Це ж стосується й появи гармоніки частотою 250 Гц. Таке явище не може бути обґрунтоване перекосом фаз та значною часткою нелінійних споживачів. А поява гармоніки 450 Гц – зрозуміла, хоча, зазвичай, вона не перевищує значень третьої гармоніки частотою 150 Гц.

Потребують уточнення внески окремих джерел та механізми зміни гармонійного складу магнітних полів у виробничих умовах. Необхідно також з'ясувати технічну та економічну доцільність використання фільтрів вищих гармонік у будівлі в цілому. Досвід показав, що пасивні фільтри не завжди ефективні, а гібридні фільтри (наприклад, [9]) мають велику вартість і є складними в експлуатації.

Розглянута проблематика має також і екологічний аспект, який полягає у тому, що наявність магнітних полів широкого спектрального діапазону негативно впливає на електромагнітну обстановку у будівлі в цілому. Тобто, негативному впливу піддаються люди, які не мають професійного відношення до обладнання.

Доцільним уявляється визначення впливу на електромагнітну обстановку стандартних, найбільш поширених нелінійних споживачів та надання кількісних характеристик (за частотою та амплітудою) їх внеску у некомпенсовані електроструми та магнітні поля гармонік промислової частоти.

### *Висновки*

1. Електромагнітна обстановка у сучасних будівлях і спорудах має складний спектр магнітних полів як за частотами, так і за амплітудами. Амплітудні та частотні характеристики цих полів є непередбачуваними через високу ймовірність наявності струмів витоку на природні та штучні заземлювачі, що потребує окремого розгляду.

2. Найбільш критичною гармонійною складовою є магнітні поля частотою 150 Гц, генеровані некомпенсованими електрострумами у нульових робочих провідниках трифазної силової електромережі. Їх джерелами є електричні та електронні технічні засоби з нелінійними вольт-амперними характеристиками, розосереджені у будівлі.

3. Локальними джерелами магнітних полів безпосередньо на робочих місцях із непередбачуваними спектральними складовими є імпульсні джерела електроживлення технічних засобів.

4. Зниження рівнів магнітних полів можливе за рахунок екранування ділянок із некомпенсованими електрострумами магнітом'якими матеріалами та зниження внеску нелінійних

електроспоживачів у загальне електронавантаження будівлі або споруди, принаймні до 15 %.

5. Використанню у будівлі або споруді різноманітних резонансних (фільтрокомпенсуючих) та гібридних фільтрів має передувати техніко-економічне обґрунтування доцільності їх експлуатації.

### Список літератури

1. Кузнецов В. Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В. Г. Кузнецов, Э. Г. Куренный, А. П. Лютый. – Донецк : Норд-Пресс, 2005. – 250 с.

2. Григорьев О. А. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ / О. А. Григорьев, В. С. Петухов, В. А. Соколов, И. А. Красилов // Новости электротехники. – 2003. – № 1. – С. 71–74.

3. Плеханов А. С. Средство компенсации реактивной мощности общепромышленных систем энергетики / А. С. Плеханов, А. И. Зайцев // Энергетические системы. – 2008. – № 3. – С. 2 – 7.

4. Саенко Ю. Л. Зниження рівнів гармонійних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік / Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко, Є. В. Бараненко // Електрифікація транспорту. – 2012. – № 3. – С. 78–83.

5. Саенко Ю. Л. Методы компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками / Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко, Е. В. Бараненко // Вісник Приазовського технічного університету. – 2013. – Вип. 26. – С. 204–210.

6. Сливкин В. Г. Электромагнитная совместимость оборудования информационных технологий при воздействии импульсных электромагнитных помех : дисс. ... кандидата техн. наук : 05.09.03 / Сливкин Виктор Геннадиевич. – Самара, 2004. – 212 с.

7. Levchenko O. G. Safelevel of electromagnetic field intensity in resistance welding / O. G. Levchenko, V. K. Levchuk // The Paton Welding Journal, 2008. – № 5. – P. 38–47.

8. Глива В. А. Моніторинг та нормалізація фізичних факторів виробничого середовища при експлуатації автоматизованих систем : дис. ... доктора техн. наук : 05.26.21 / Глива Валентин Анатолійович. – К., 2012. – 320 с.

9. Кирюхин А. Ю. Гибридный фильтр высших гармоник для трехфазных сетей переменного тока 0,4 кВ / А. Ю. Кирюхин, И. Г. Буре // Электротехника. – № 5. – 2008. – С. 37–41.

*Дата подання статті до збірника – 2.03.2015*